

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA

# *MULTICLONE*

PMC 581 - PROJETO MECÂNICO II

Orientador: Prof. Hildo Pera

Aluno: Tamio Harada 4212992

## Índice

	página
1. Introdução	03
2. Proposta de projeto	03
3. Dados de projeto	03
4. Processo industrial	05
5. Poluição do ar	05
5.1. Fonte de emissão	05
5.2. Características das emissões	05
5.3. Características do sistema de ventilação	06
6. Classificação dos métodos para separação de particulados	07
7. Tecnologia de controle	12
7.1. Procedimentos de controle	12
7.2. Características dos equipamentos de controle	12
7.2.1. Precipitador eletrostático	12
7.2.2. Lavador	12
7.2.3. Filtro de tecido	14
7.2.4. Bateria de ciclones	14
7.3. Outros procedimentos de controle	15
7.4. Padrões de emissão, condicionamento e projeto	15
8. Considerações finais a respeito dos equipamentos de controle	16
9. Multiclones - Principais campos de utilização	16
10. Descrição de funcionamento	17
11. Descrição construtiva	19
12. Cálculos	20
13. Bibliografia	28
14. Anexos	29

## **. INTRODUÇÃO.**

Houve épocas em que as chaminés desprendendo grandes volumes de fumaça negra estavam diretamente ligadas ao crescimento e desenvolvimento de uma cidade.

A partir do momento em que essas emissões se tornaram uma ameaça à sociedade e à ecologia, tornou-se necessário um controle mais rígido em relação aos gases e as partículas liberadas à atmosfera.

Tendo em vista o fato acima citado, o presente trabalho se aplica às atividades de produção de vapor em caldeiras à combustível líquido que deverão ter suas fontes de poluição controladas quando necessário, de acordo com as especificações desta ou utilizando-se de tecnologias de controle de igual ou superior eficiência de retenção de poluentes.

## **. PROPOSTA DE PROJETO.**

Projetar uma unidade de captação de particulados resultantes da queima de óleo 1A em uma unidade geradora de vapor, a fim de garantir na saída da chaminé a coleta de partículas maiores que 10 microns.

### **DADOS DE PROJETO.**

Campo de aplicação: captação de particulados provenientes de uma unidade geradora de vapor;

Tipo de combustível utilizado: óleo combustível tipo 1A;

Consumo médio de óleo combustível: 2950 kg em 3 horas;

Temperatura média dos gases na saída da caldeira: 280 °C;

Porcentagem de CO<sub>2</sub> medido: 13,8%;

Distribuição do tamanho das partículas;

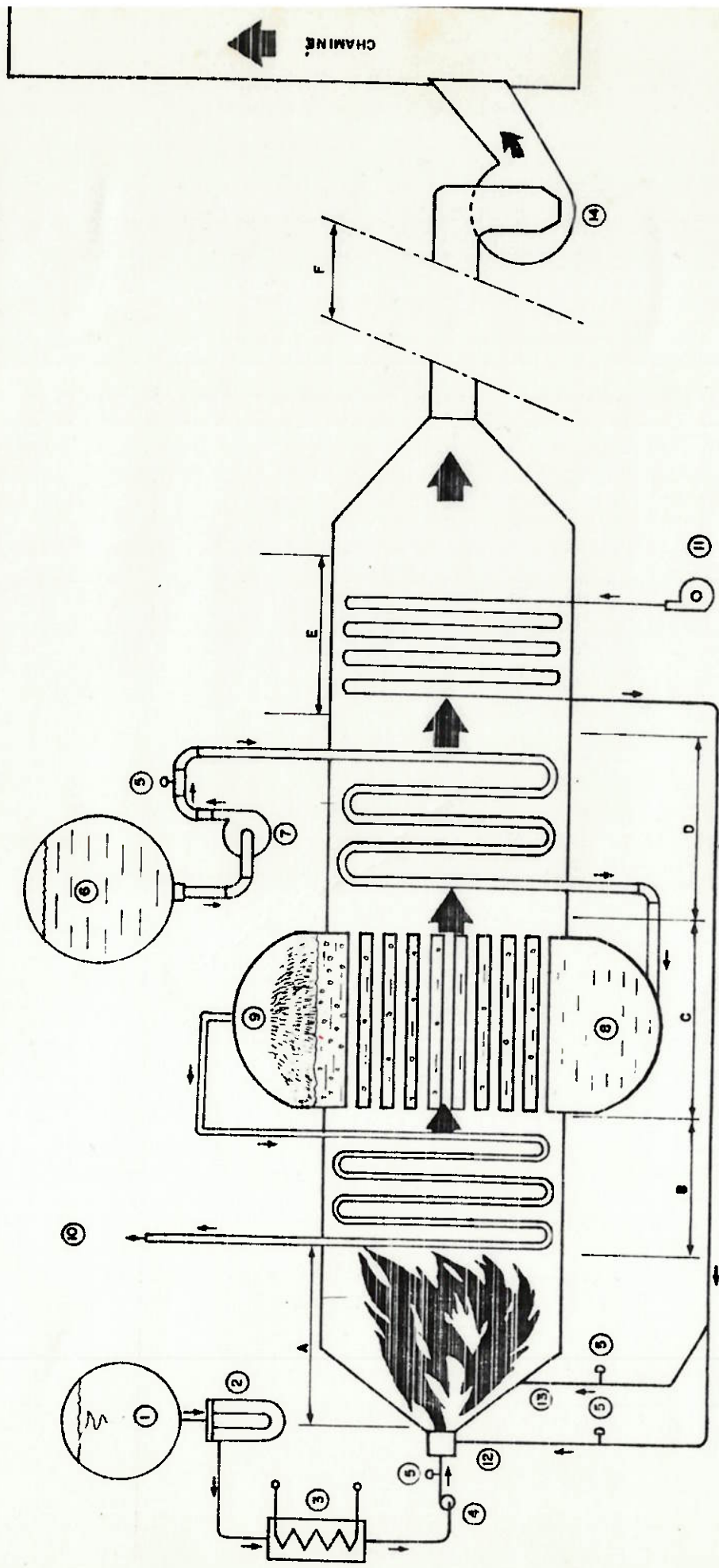
Densidade das partículas: 2,45 g/cm<sup>3</sup>

Densidade dos gases secos: 1,3 kg/m<sup>3</sup>

Umidade contida nos gases: 0,120 kg/m<sup>3</sup>

Queda de pressão admissível ao longo do multiclone: 40 mmH<sub>2</sub>O.

FIGURA 1: FLUXOGRAMA GERAL DE UMA CALDEIRA A COMBUSTÍVEL LÍQUIDO PARA PRODUÇÃO DE VAPOR D'ÁGUA OU AQUECIMENTO DE FLUIDO TÉRMICO.



- ① TANQUE DE ÓLEO
- ② FILTRO DE ÓLEO
- ③ PRÉ-AQUECEDOR DE ÓLEO
- ④ BOMBA DE ÓLEO
- ⑤ VÁLVULA REGULADORA
- ⑥ TANQUE D'ÁGUA
- ⑦ BOMBA D'ÁGUA

- ⑧ ÁGUA PRÉ-AQUECIDA
- ⑨ VAPOR D'ÁGUA
- ⑩ VAPOR SUPERAQUECIDO
- ⑪ SOPRADOR DE AR FRIO
- ⑫ AR PRIMÁRIO PRÉ-AQUECIDO
- ⑬ AR SECUNDÁRIO PRÉ-AQUECIDO
- ⑭ EXAUSTOR DOS GASES DA COMBUSTÃO.

- A - CÂMARA DE COMBUSTÃO DE ÓLEO (FORNALHA)
- B - CÂMARA DE SUPERAQUECIMENTO ( SUPERAQUECEDOR )
- C - CÂMARA DE PRODUÇÃO DE VAPOR ( CALDEIRA )
- D - CÂMARA DE PRÉ-AQUECIMENTO D'ÁGUA ( ECONOMIZADOR )
- E - CÂMARA DE PRÉ-AQUECIMENTO DE AR ( PRÉ-AQUECEDOR )
- F - EQUIPAMENTO DE CONTROLE DE POLUIÇÃO ( E C P )

OBS: A ÁGUA PODE, SER SUBSTITUÍDA POR UM FLUIDO TÉRMICO.  
 O FLUIDO TÉRMICO NO PONTO ⑥ PODE ESTAR NA FASE LÍQUIDA.

## 1. PROCESSO INDUSTRIAL.

A produção de vapor ou aquecimento de fluido térmico em caldeiras é feita a partir da queima de óleos combustíveis, gerando-se calor e transferindo-o através de superfícies metálicas para a água ou um fluido térmico. Estes óleos combustíveis apresentam teor de enxofre variável e estão relacionados a seguir conforme tal teor, em ordem decrescente: tipo E, tipo A ou BPF, tipo G, tipo F, tipo D ou BTE, tipo H e tipo resíduo de vácuo.

A Figura 1 apresenta o fluxograma típico de uma caldeira à combustível líquido para produção de vapor ou aquecimento de fluido térmico.

## 2. POLUIÇÃO DO AR.

### 2.1. FONTE DE EMISSÃO.

As principais fontes de emissão da poluição do ar em caldeiras estão relacionadas com a chaminé durante:

- ) a operação normal de funcionamento da caldeira;
- ) a limpeza dos tubos através de sopragem com vapor (ramonagem), ou após a limpeza dos tubos com escovas de aço ou esferas de aço.

### 2.2. CARACTERÍSTICAS DAS EMISSÕES.

) principal poluente: produtos de combustão (material particulado e gases);

) tipo:

- cinza e fuligem como material particulado e,
- dióxido de enxofre, NOx, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e outros como gases.

distribuição do tamanho das partículas:

- cinza 85 a 93% em peso < 1 micron e  
2% em peso > 5 microns,
- fuligem aprox. 40% em peso < 5 microns.

densidade da partícula de cinza: 2,45 g/cm<sup>3</sup>

e) fatores de emissão para queima de óleo combustível expressos em kg por m<sup>3</sup> de óleo combustível utilizado:

TIPOS DE POLUENTES	TIPOS DE CALDEIRAS (i)	
	TERMOELÉTRICA	INDL. E CIAL.
Material particulado	1,25(S) + 0,38	1,25(S) + 0,38
SO <sub>2</sub> (ii)	19(S)	19(S)
NO <sub>x</sub> (ii)	0,25(S)	0,25(S)
COx (como NO <sub>2</sub> )	A (iii)	7,5
CO (iv)	0,63	0,63
HC (como CH <sub>4</sub> )	0,12	0,12
Aldeídos (como HCHO)	0,12	0,12

- i) Classificação das caldeiras:  
 1- Termoelétricas  $\geq 63 \times 10^6$  Kcal/h  
 2- Caldeiras industriais  $\geq 3,7 \times 10^6$ ;  $< 63 \times 10^6$  Kcal/h  
 3- Caldeiras comerciais  $\leq 3,7 \times 10^6$  Kcal/h
- ii) (S) é a porcentagem de enxofre em peso no combustível.
- iii) A = 6,25 para caldeiras com maçarico tangencial;  
 A = 12,6 para todos os outros tipos de maçaricos.
- iv) As emissões de CO podem ser multiplicadas por 10 a 100, se a unidade for mal operada ou mantida inadequadamente.

### 3. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO.

i) o próprio funcionamento da caldeira promove uma boa tiragem dos gases formados pela combustão do óleo;

ii) vazão de controle:

$$Q = 12.C.[1 + (EA/100)] \quad (\text{m}^3/\text{h}) \text{ a } 21 \text{ }^\circ\text{C e } 1 \text{ atm}$$

onde: C = consumo de óleo combustível (l/h)

EA = excesso de ar em porcentagem

Obs.: A vazão de controle real pode variar de  $\pm 15\%$  em relação à vazão de controle calculada pela expressão acima.

temperatura dos gases: 120 a 380 °C;

velocidade média de transporte: 1070 a 1220 m/min;

perda de carga na caldeira: em torno de 140 mmCA.

## 6. CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS PARA SEPARAÇÃO DE PARTICULADOS.

Fundamentados em alguns princípios da fluidodinâmica e da ionização dos gases pode-se agrupar todos os aparelhos em dois grupos: os chamados separadores a seco e os separadores a úmido.

Fazem parte do primeiro grupo:

a) aparelhos que separam as partículas baseados na força da gravidade.

Cada partícula incorpora uma determinada massa que pela ação da gravidade tendem a cair. As que possuem massas reduzidas sofrem a influência do fluxo e a resistência do meio gasoso e continuam a ser arrastadas pelos gases. Portanto, um aparelho deste princípio de funcionamento tende a separar as partículas maiores e exibem rendimentos bastante modestos. Para atenuar o efeito de elutriação, os gases atravessam estes aparelhos com velocidades muito baixas, da ordem de 1 a 2 m/s determinando a construção de câmaras de grandes dimensões. Mesmo nestas condições, a eficiência não ultrapassa 40 a 50%.

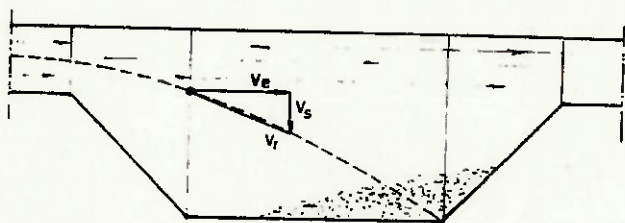


Fig.2 - Câmara de Decantação.

Admitindo como velocidade de entrada da partícula  $V_e$  e  $V_s$  a velocidade de sedimentação, a resultante  $V_r$  terá por valor:

$$V_r = \sqrt{V_e^2 + V_s^2}$$

A câmara deve ser projetada de forma a assegurar o ingresso das partículas no ponto mais elevado da mesma e criar uma direção de queda com a velocidade resultante que as projete no ponto de captação.

Embora a aparelhagem apresente a possibilidade de captação de partículas, sua limitação resulta da baixa eficiência, em torno de 45 a 50%, prestando-se na retenção de partículas de no máximo 50 microns.

a) a força centrífuga constitui outro recurso para concepção de aparelhos separadores, dentre os quais o mais divulgado é o Ciclone.

Promove-se à corrente impregnada de partículas uma mudança de direção em movimento rotatório no interior de um cilindro através da introdução tangencial dos fluidos. O percurso da partícula sofre a ação conjunta da força de gravidade, da força de inércia da corrente gasosa e da força de inércia da própria partícula, promovendo a sua separação.

Mediante esta tecnologia, separam-se até 90% das partículas, sendo tratadas geralmente as de dimensões inferiores a 10 microns.

Dentre estes dois primeiros processos, ambos enquadrados nos separadores à seco, o último representa uma das soluções mais difundidas na captura de partículas, apresentando como desvantagem, uma perda de carga elevada da ordem de 60 a 110 mmCA.

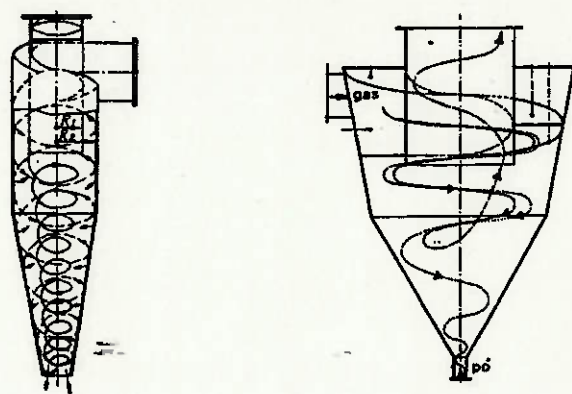


Fig.3 - Exemplos de Ciclones Separadores de Poeiras.

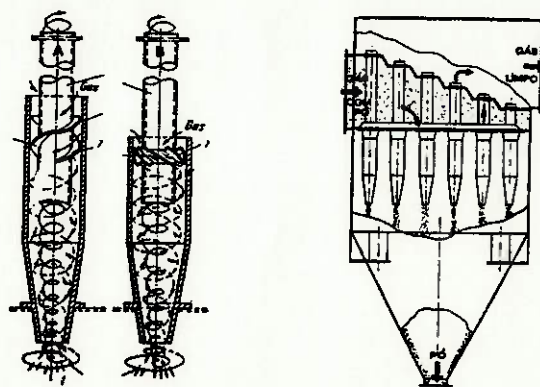


Fig.4 - Conjunto de Multiciclones, com o corte ampliado dos elementos que compõem o aparelho tipo A e B.

c) com o intuito de aumentar a eficiência de captação a seco, desenvolveu-se os filtros com tecidos, também conhecidos por Filtros de Manga, com resultados superiores aos primeiros uma vez que retém 99% das partículas.

As Mangas são executadas com tecidos de algodão ou fibras sintéticas inclusive com fibras de vidro, de acordo com a temperatura e a composição química dos gases.

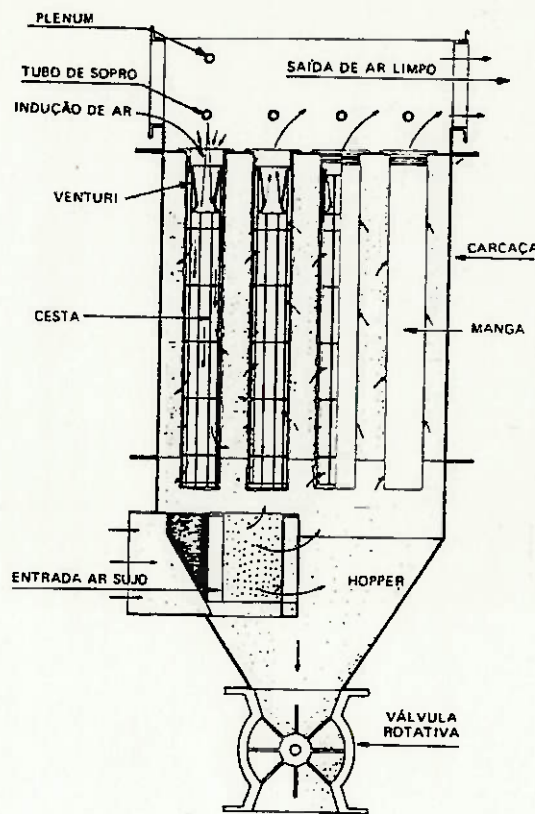


Fig.5 - Filtro de Manga Completo com acessórios de extração contínua das poeiras.

O problema mais delicado nestes aparelhos está no material utilizado para a execução dos tecidos das mangas, o qual tem uma participação considerável no custo de fabricação. Se a sua durabilidade for comprometida pelas condições de trabalho, a instalação de um filtro de manga deixa de ser viável apesar de representar um excelente processo de captação.

) em substituição ao filtro de manga, que responde pela captação a seco com eficiência elevada, há o Filtro Eletrostático.

O aparelho consiste de uma câmara de passagem dos gases onde se estabelece um campo de alta tensão elétrica, provocando a ionização de todas as partículas. As partículas carregadas com os ions elétricos são atraídas pelos eletrodos componentes do campo. Graças a um processo mecânico de percussão periódica, as partículas presas aos eletrodos se esprenhem e caem em coletores que se incumbem da extração do material colante.

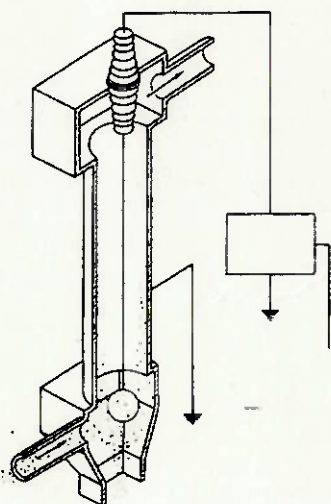


Fig.6 - Elemento básico de um precipitador Eletrostático.

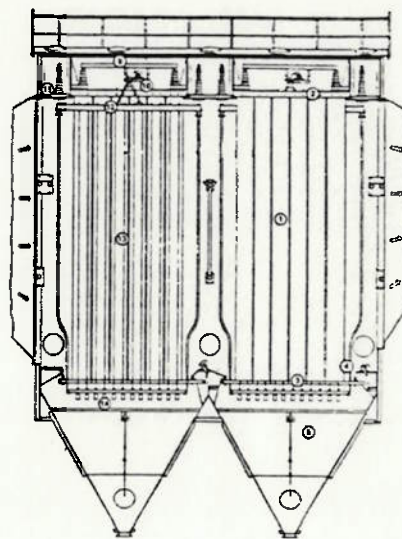


Fig.7 - Vista geral de um Precipitador Eletrostático.

No segundo grupo de aparelhos, recorreu-se à água para reter as partículas contidas nos gases. A série de aparelhos se denominam precipitadores à Umido, dentre eles, o Ciclone Lavador (Scrubber), o Venturi, o Ciclone com Filtros ou Anéis de Cerâmica, Coletores de Bolhas ou Espumas; enfim, uma variedade apreciável de concepções construtivas.

Todos se baseiam no fato da partícula sólida se agregar à gotícula de água ou à um lençol de água separando-se da fase gasosa.

A eficiência destas concepções varia de projeto para projeto, porém atingem valores superiores aos captadores ciclônicos.

As figuras 8 e 9 representam algumas das formulações construtivas.

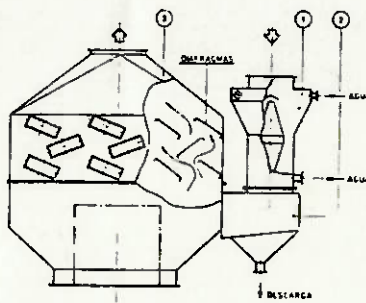


Fig.8 - Lavador de gases tipo Venturi com Separador de Gotículas.



Fig.9 - Lavador de gases tipo Demister com Separador de Gotículas.

No dimensionamento de qualquer tipo de aparelho de captação de particulados importa conhecer não somente a concentração dos sólidos como também a sua classificação granulométrica. O conhecimento da distribuição dos tamanhos das partículas é de importância vital para a determinação da eficiência e até na própria seleção do equipamento mais apropriado à separação.

A Tabela 1 fornece a título de exemplo, o campo de aplicação das diferentes aparelhagens de captação. A eficiência de um aparelho separador obtida pela relação entre a massa de particulado coletada e a massa total existente na corrente gasosa.

TIPO DE APARELHO	CAMPO DE APLICAÇÃO
Âmara de sedimentação	Coleta de partículas grandes entre dimensões de 100 a 150 microns
ciclones de baixa perda de carga	Coleta de partículas entre 50 a 60 microns
ciclones de alta eficiência	Coleta de partículas até 10 microns
lavadores a úmido	Coleta de partículas até 5 microns
filtros de manga	Coleta de partículas até 1 micron
filtro eletrostático	Coleta de partículas até 0,1 micron

Tabela 1 - Campo de aplicação dos diferentes princípios de aparelhos captadores de partículas elutriados com os gases de combustão.

## 7. TECNOLOGIA DE CONTROLE.

### 7.1. PROCEDIMENTOS DE CONTROLE.

Deve-se fazer a instalação dos equipamentos de controle de poluentes entre o equipamento de produção de vapor e o ventilador e/ou entre o ventilador e a chaminé.

Como citado anteriormente, os tipos de equipamentos de controle de poluentes normalmente utilizados são:

- a) precipitador eletrostático;
- b) precipitador eletrostático com lavador em série;
- c) bateria de ciclones com precipitador eletrostático em série;
- d) lavador;
- e) filtro de tecido;
- f) bateria de ciclones em paralelo para controle de fuligens.

### 2. CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE.

#### 2.1. PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO.

- a) velocidade de passagem do fluxo gasoso: 0,61 a 2,44 m/s;
  - b) tempo de residência do fluxo gasoso: 2 a 10 s;
  - c) temperatura do fluxo gasoso: 370 °C;
  - d) eficiência de coleta de material particulado: 90% em peso;
  - e) eficiência de remoção de dióxido de enxofre: máximo de 50% com injeção de calcário na fornalha;
- perda de carga: 2,5 a 12,7 mmCA.

#### 2.2. LAVADOR.

- perda de carga:
- torre de pratos: (50 + 38 por prato) mmCA;
  - venturi: 150 a 1500 mmCA;
  - separador de gotas: 110 mmCA;
  - torre de enchimento: 6 a 33 mmCA por 10 cm de enchimento;
  - torre de leito móvel: 70 a 250 mmCA por estágio;
  - torre de spray: 60 mmCA.

- b) eficiência de coleta para material particulado:  
 - 95 a 99,7% em peso para venturi com separador de gotas;  
 - acima de 99% em peso para torre de leito móvel.

c) eficiência de coleta para dióxido de enxofre através dos seguintes processos de dessulfurização:

PROCESSOS	EFICIÊNCIAS
Solução de sódio	> 90%
Amônia	90%
Calçário ou dolomita (via úmida)	90%
Duplo alcali (Double Alkaly)	> 90%
Solução de óxido de magnésio	95%
Oxidação catalítica (CAT-OX da Monsanto)	90%
Carbonato derretido (Atomics International)	95%
Formiato de potássio	90%
Oxido de zinco	90%
YCO	90%
URGI (adsorção via úmida)	< 90%
Sulfato	90%

Os tipos de lavadores normalmente utilizados nos processos de dessulfurização são:

- torre de enchimento;
- torre de pratos;
- venturi com separador de gotas;
- torre de spray.

### 2.3. FILTRO DE TECIDO.

) mecanismo de limpeza: fluxo reverso, fluxo reverso e sacudimento, sacudimento, jato pulsante ou reverso;

) meio filtrante e temperatura de operação dos gases:

- fibra de vidro	287 °C
- teflon	260 °C
- acrílico (100% homopolímero)	148 °C
- poliéster	135 °C
- polipropileno	93 °C

) velocidade de filtragem:

- 0,46 a 0,91 m/min para fluxo reverso e/ou sacudimento;
- 1,16 a 2,13 m/min para jato pulsante ou reverso.

) eficiência de coleta para material particulado: 98% em peso;

) eficiência de remoção de dióxido de enxofre:

- máximo de 50% com injeção de calcário na fornalha;
- 48 a 73% com injeção de minério de nacolita em pó (70 a 90% de carbonato de sódio) no duto antes do filtro.

) perda de carga: 120 a 150 mmCA.

### 2.4. BATERIA DE CICLONES.

) eficiência de coleta para material particulado (fuligem): 60% em peso;

) eficiência de remoção de dióxido de enxofre: 90% com injeção de óxido de manganês ativado numa torre de contato antes da bateria de ciclones;

) perda de carga: 50 a 150 mmCA.

Baterias de ciclones são normalmente utilizadas para controle de fuligem proveniente da operação de sopragem na caldeira e para controle de dióxido de manganês ativado não reagido e sulfato de manganês formado na remoção de dióxido de enxofre (absorção seca).

### 3. OUTROS PROCEDIMENTOS DE CONTROLE.

) substituição da caldeira a óleo combustível por caldeira elétrica: emissões de poluentes totalmente controladas;

) substituição ou adaptação da caldeira a óleo combustível por caldeira a gás de rua, ou GLP, ou gás de lenha, ou gás de carvão vegetal: eficiência para controle de material particulado superior a 94% em peso e de dióxido de enxofre superior a 99% em peso;

) substituição ou adaptação da caldeira a óleo combustível por caldeira a gás de carvão mineral: eficiência para controle de material particulado superior a 96% em peso, entretanto para o controle de dióxido de enxofre haverá a necessidade de dessulfurização prévia do gás combustível na planta e gaseificação;

) substituição do uso de óleos pesados (BPF, E e G) pelo uso de óleos com baixo teor de enxofre (BTE, F e H): eficiência para controle de dióxido de enxofre igual ou um pouco superior a 80% em peso, entretanto para o controle de material particulado a eficiência será em torno de 75% em peso;

) substituição da caldeira a óleo combustível por caldeira a lenha ou carvão vegetal: eficiência para controle de dióxido de enxofre superior a 97% em peso, entretanto para o controle de material particulado haverá a necessidade da instalação de equipamento de controle de poluentes.

### 4. PADRÕES DE EMISSÃO, CONDICIONAMENTO E PROJETO.

Atender ao disposto nos seguintes artigos do Regulamento da Lei nº 997 de 31.05.76, aprovado pelo Decreto nº 8468 de 08.09.76:

) artigo 31 e seu parágrafo único, este com a redação dada pelo Decreto nº 5425 de 23.07.80;

) artigo 34;

) artigo 37 e seu parágrafo único;

) artigo 41.

## **. CONSIDERAÇÕES FINAIS A RESPEITO DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE.**

Conforme dados disponíveis na CETESB, os equipamentos mais usuais para controle de material particulado em caldeiras são: ciclones, multiciclones e lavadores.

Os ciclones e multiciclones, devido à sua baixa eficiência de retenção de partículas pequenas são normalmente usados como pré-coletores, embora não seja raro constatar a sua utilização como o equipamento propriamente dito.

Os multiciclones apresentam as seguintes vantagens em relação aos ciclones: são mais eficientes, apresentam menor perda de carga para eficiências equivalentes e resistem melhor à abrasão, porém possuem como desvantagem o entupimento mais frequente.

Os lavadores, por sua vez, dependendo do tipo apresentam eficiência de remoção muito superior ao dos ciclones e multiciclones, razão pela qual são usados com maior frequência para atender as exigências de controle mais restritivas.

Os filtros de tecido e os precipitadores eletrostáticos são equipamentos que apresentam maior eficiência de remoção que os citados anteriormente, porém seu emprego é menos usual em função de fatores limitantes, tais como: o custo elevado desses equipamentos, a temperatura dos gases resultantes da combustão e o carregamento de fagulhas incandescentes no caso de filtros de tecido.

## **. MULTICLONES - PRINCIPAIS CAMPOS DE UTILIZAÇÃO.**

Os multiciclones são utilizados principalmente na separação de materiais particulados e/ou abrasivos a temperaturas elevadas, como por exemplo:

- Indústria Cimenteira, Resfriador de Clinquer;
- Caldeiras, Cinza Volante;
- Instalação de Incineração de Lixo.

Produtos	Aplicações											
	Minas – Mineração	Ferro, Aço – Trabalhos em Metal	Fundições	Indústria Geral	Cimento e não Metálicos	Indústria Química	Papel e Celulose	Indústria Madeireira	Alimentação	Indústria Têxtil	Usina de Força – Incineração	Centrais de aquecimento – Caldeiras
separação de Pó												
Coletores Dinâmicos												
Multiciclone	•	•	•	•	•	•	•				•	•
Ciclone de Alta Eficiência	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
Bateria de Ciclones	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
Ciclones Universais				•	•	•	•	•		•		
Ciclones para Sinterização	•	•	•	•	•	•						
Separadores a úmido												
Lavadores												
Scrubbers	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	
Scrubber de Alta Eficiência	•	•		•	•							
SO <sub>2</sub> – Scrubber		•	•			•					•	•
Venturi	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Coletores de Mangas												
Automáticos e Manuais	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Inversão de Fluxo de Ar	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Com Injeção de Ar Comprimido	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

## 10. DESCRIÇÃO DE FUNCIONAMENTO.

A bateria de multiciclones é composta de 3 elementos básicos:

- o corpo superior com a entrada e saída de gases;
- a bateria de ciclones com as guias de ar;
- a(s) moega(s) coletora(s) de material.

A bateria de multiciclones para separação de material particulado, ilustrada na figura 10, é composta de ciclones dispostos simetricamente com entradas e saídas axiais do fluido.

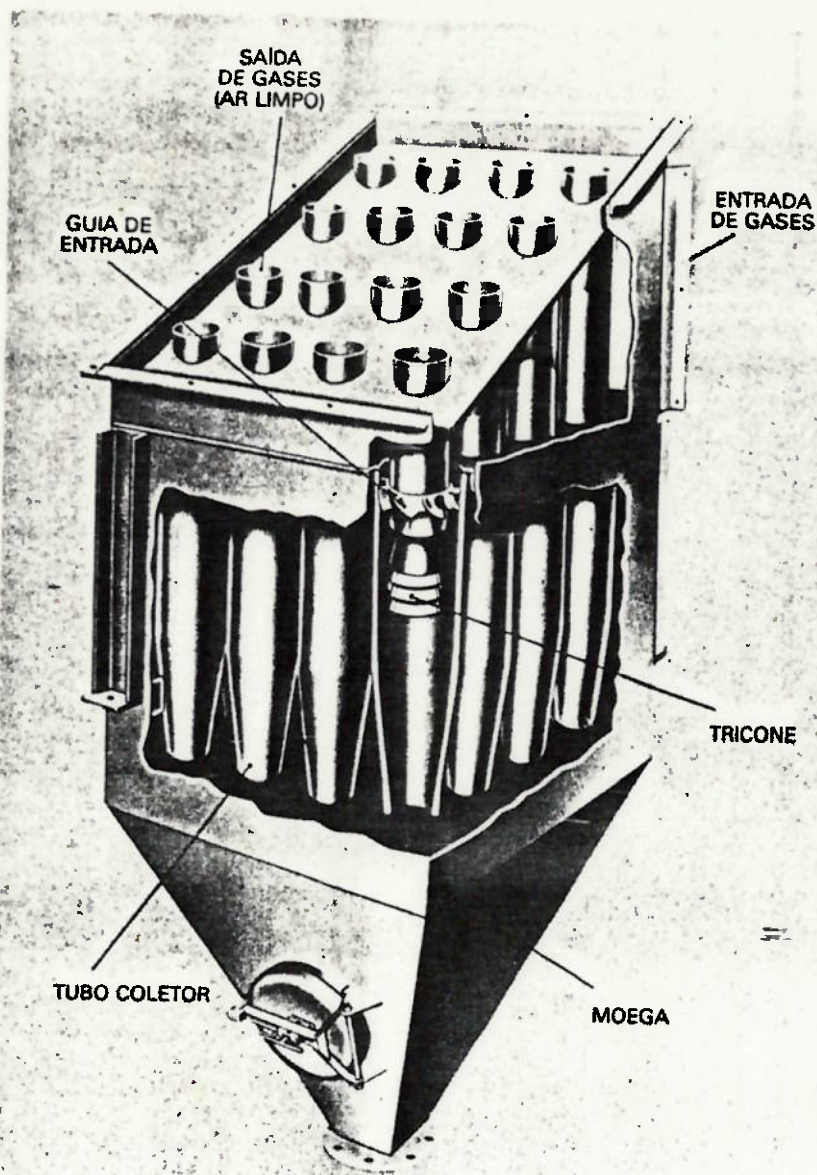


Fig.10 - Estrutura de um Multiclone.

O corpo superior é dividido em plenum de entrada e plenum de saída por meio da colmeia (chapa divisória escalonada) sendo que os gases com material particulado são conduzidos ao plenum de entrada através do bocal de entrada.

Por meio do plenum obtém-se uma distribuição dos gases praticamente uniforme para todos os ciclones, passando primeiramente pelas guias de ar onde é dado um efeito direcional de ciclonagem aos gases, entrando a seguir no corpo do ciclone, onde ocorre a separação das partículas de material particulado, após o que os gases são aspirados do ciclone através dos tubos de ar para o plenum de saída e deste para o ventilador e a chaminé.

O material separado nos ciclones é descarregado na parte inferior dos mesmos para a(s) tremonha(s) coletora(s). Desta(s) é eliminado por meio de válvula(s) rotativa(s).

O movimento vorticoso dentro do tubo gera forças centrífugas que lançam as partículas de poeira suspensas no gás contra a parede interna do cilindro. Estas forças centrífugas dependem da velocidade do gás e do diâmetro do cilindro, dentro do qual o gás é turbilhonado: menores diâmetros e maiores velocidades de entrada do gás criam maiores forças centrífugas.

A fim de aumentar a eficiência de separação, os multiclones podem ser equipados com dispositivos especiais de recuperação de energia chamados de Spirocones e Tricones.

## 1. DESCRIÇÃO CONSTRUTIVA.

Os corpos dos ciclones e as suas respectivas guias de ar são de material fundido e podem ser fornecidos em GG30 ou Ni-Hard, dependendo das características físicas do material a ser separado e seu grau de abrasividade, cujas faixas de dureza Brinell são respectivamente 180 a 220 Hb e 420 a 550 Hb.

O corpo superior é de construção soldada e subdividida em plenum de entrada e plenum de saída por meio da colmeia, sendo dotado de bocal de entrada e saída com as respectivas flanges para interligação.

Os ciclones com as guias de ar são instalados abaixo da colmeia, apoiados sobre uma base de perfilados soldadas ao corpo superior.

A vedação é obtida por meio de cordões de amianto e uma massa especial e calafetar.

O corpo inferior da bateria de multiclones consiste de uma ou mais tremonhas coletoras, tendo esta(s) em sua descarga um registro gaveta e uma válvula rotativa.

Na tremonha estão soldadas as sapatas de sustentação da bateria de multiclones as quais estão apoiadas sobre um quadro de perfis U ou H. Este quadro é aparafusado com a estrutura metálica, também construído de perfilados soldados e aparafusados.

Para inspeção e manutenção estão previstas 3 portas de acesso providas de fechos rápidos, localizados no plenum de entrada, plenum de saída e tremonha.

## 12. CÁLCULOS.

Uma unidade geradora de vapor, queimando óleo combustível tipo 1A, submetida a ensaios pelo método indireto registrou os seguintes dados finais:

- temperatura média dos gases na saída da caldeira: 280 °C;
- porcentagem de CO<sub>2</sub> medido: 13,8%.

Considerando-se estes valores, foi determinado a produção de vapor horária média desta unidade. E, sabendo-se que:

- a análise elementar em peso do combustível é:

carbono	81,9%
hidrogênio	11,1%
enxofre	5,0%
água-sedimentos	2,0%

- durante as três horas de ensaio, foram queimados 2950 kg/óleo BPF;
- a pressão da caldeira se manteve em 14 kgf/cm<sup>2</sup>, produzindo vapor saturado;
- a temperatura da água de alimentação foi de 80 °C e a do ar 21 °C;
- a perda por irradiação dada pelo fabricante representa 1,0%;

A vazão de controle é obtida através da fórmula descrita na seção 13.:

$$Q = 12.C.[1+(EA/100)] \quad (\text{m}^3/\text{h}) \text{ a } 21 \text{ °C e } 1 \text{ atm}$$

Logo, deve-se calcular EA que representa o excesso de ar em porcentagem. E, esta determinação emprega as expressões a seguir:

$$V_{O_2}^t = 1,864.c + 5,56.h + 0,697.s$$

$$V_{O_2}^t = 1,864 \times 0,819 + 5,56 \times 0,111 + 0,697 \times 0,05$$

$$V_{O_2}^t = 2,179 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{ar}^t = V_{O_2}^t \times (100/21)$$

$$V_{ar}^t = 2,179 \times (100/21)$$

$$V_{ar}^t = 10,38 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Logo, posse deste dado se determina agora:

$$V_{g}^{tu} = 1,8535.c + 0,693.s + 0,79.V_{ar}^t + 9.h.1,24$$

$$V_{g}^{tu} = 1,8535 \times 0,819 + 0,693 \times 0,05 + 0,79 \times 10,38 + 9 \times 0,111 \times 1,24$$

esta equação, cada parcela representa a participação de cada componente da mistura:

$$V_{g^{tu}} = 1,518(\text{CO}_2) + 0,0347(\text{SO}_2) + 8,200(\text{N}_2) + 1,239(\text{H}_2\text{O})$$

$$V_{g^{tu}} = 10,99 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (\text{a úmido}) \text{ ou}$$

$$V_{g^{tu}} = 10,99 - 1,24 = 9,75 \text{ Nm}^3/\text{kgcomb.} \quad (\text{a seco})$$

Finalmente, temos:

$$EA = \frac{(\text{CO}_2)_{\max}}{(\text{CO}_2)_{\text{med}}}$$

$$\text{onde: } (\text{CO}_2)_{\max} = \frac{1,518 \times 100}{9,75} = 15,57\%$$

$$EA = \frac{15,57}{13,8} = 1,128$$

$$EA = 12,8\% \text{ de excesso de ar}$$

Portanto:

$$Q = 12 \cdot \frac{2950}{3 \times 0,981} \cdot [1 + 0,128]$$

$$Q = 13568 \text{ m}^3/\text{h}$$

Este multiclone foi projetado para a limpeza de gases provenientes da queima de óleo 1A em uma unidade geradora de vapor.

De posse dos dados acima, visto que a vazão de controle é de 13568 m<sup>3</sup>/h com uma variação de 15%, fixaremos sua capacidade máxima de gases a serem limpos em 14000 m<sup>3</sup>/h a uma temperatura de 280 °C. A densidade dos gases secos é de aproximadamente 1,3 kg/m<sup>3</sup> e os gases carregam 120 g de vapores d'água por m<sup>3</sup>. A pressão atmosférica é de 760 mmHg. Ainda mais, na entrada do multiclone os gases estão sobre um vácuo de 30 mmH<sub>2</sub>O. A queda de pressão ao longo do multiclone não poderá exceder 40 mmH<sub>2</sub>O. A distribuição do tamanho das partículas (encontrados através da elutriação do ar) é dada na Tabela 2 abaixo.

Tamanho das partículas, microns	Diâmetro médio das partículas, microns	Quantidade de material separado, %
<5	2,5	9,6
5-15	10,0	16,2
15-25	20,0	24,7
25-35	30,0	35,3
>35	35,0	14,2

Tabela 2 - Distribuição do tamanho das partículas encontradas através da elutriação do ar.

A densidade dos gases em condição de operação é determinado através da fórmula:

$$d_o = \frac{0,289 \cdot (d_s + f) \cdot (B + p_{at})}{(0,804 + f) \cdot (273 + t)}$$

onde:  $d_s$  = densidade dos gases secos = 1,3 kg/m<sup>3</sup>  
 $f$  = umidade contida nos gases = 0,120 kg/m<sup>3</sup>  
 $B$  = pressão atmosférica = 760 mmHg  
 $p_{at}$  = vácuo na entrada do multiciclone = 30 mmH<sub>2</sub>O ou 2 mmHg  
 $t$  = temperatura do gás = 280 °C

$$d_o = \frac{0,289 \cdot (1,3 + 0,120) \cdot (760 - 2)}{(0,804 + 0,120) \cdot (273 + 280)}$$

$$d_o = 0,609 \text{ kg/m}^3$$

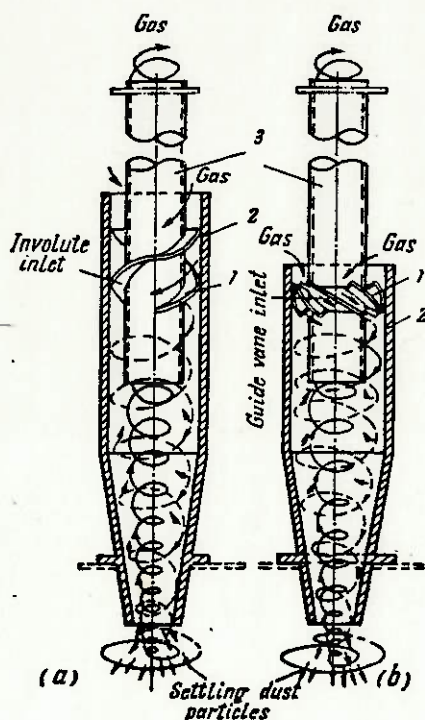


Fig.11 - Unidade de ciclone para multiciclones.  
a) Involute inlet  
b) Guide vane inlet

No projeto será utilizado o ciclone tipo guide vane inlet (pás orientadas para admissão), conforme fig.11(b) acima.

Para o cálculo da velocidade de entrada do gás  $w_{in}$ , utilizaremos a seguinte fórmula da resistência aerodinâmica  $\Delta p$ :

$$\Delta p = \frac{k' \cdot w_{in}^2 \cdot d}{2 \times 9,81}$$

Logo,

$$w_{1n}^2 = \frac{\Delta p \cdot 2 \times 9,81}{d \cdot k'}$$

$$w_{1n}^2 = \frac{40}{0,609} \cdot \frac{2 \times 9,81}{6,7}$$

$$w_{1n}^2 = 192,3$$

$$w_{1n} = 14 \text{ m/s}$$

Muitas vezes a resistência aerodinâmica do ciclone é calculada em função da velocidade nominal do gás  $w_n$  relacionada com toda a área transversal da parte cilíndrica do ciclone.

$$\Delta p = \frac{k \cdot w_n^2 \cdot d}{2 \times 9,81}$$

Os valores dos coeficientes de resistência aerodinâmica  $k$  e  $k'$  dependem do projeto do ciclone e eles foram tirados do livro G.Gordon, Dust collection and Gas Cleaning, pág. 170.

O ciclone tipo guide vanes tem  $k = 140$  para um ângulo de hélice  $\theta = 5^\circ$ . Desde que a queda de pressão admissível ao longo do multiciclone foi especificado em 40 mmH<sub>2</sub>O, a velocidade nominal  $w_n$  pode ser calculada da seguinte forma:

$$\frac{40}{0,609} = 140 \cdot \frac{w_n^2}{2 \times 9,81}$$

$$w_n = 3,03 \text{ m/s}$$

quantidade de gases limpos em um único ciclone é:

$$V = \frac{F_i \cdot D^2 \cdot 3600 \cdot w_n}{4}$$

$$V = 0,785 \times 0,18^2 \times 3600 \times 3,034$$

$$V = 278 \text{ m}^3/\text{h}$$

número de ciclones necessários é:

$$n = \frac{14000}{278}$$

$$n = 50 \text{ ciclones}$$

Assumiremos que haverão 2 multiciclones com 25 unidades de ciclones em cada um dispostos da seguinte forma: 5 fileiras x 5 colunas.

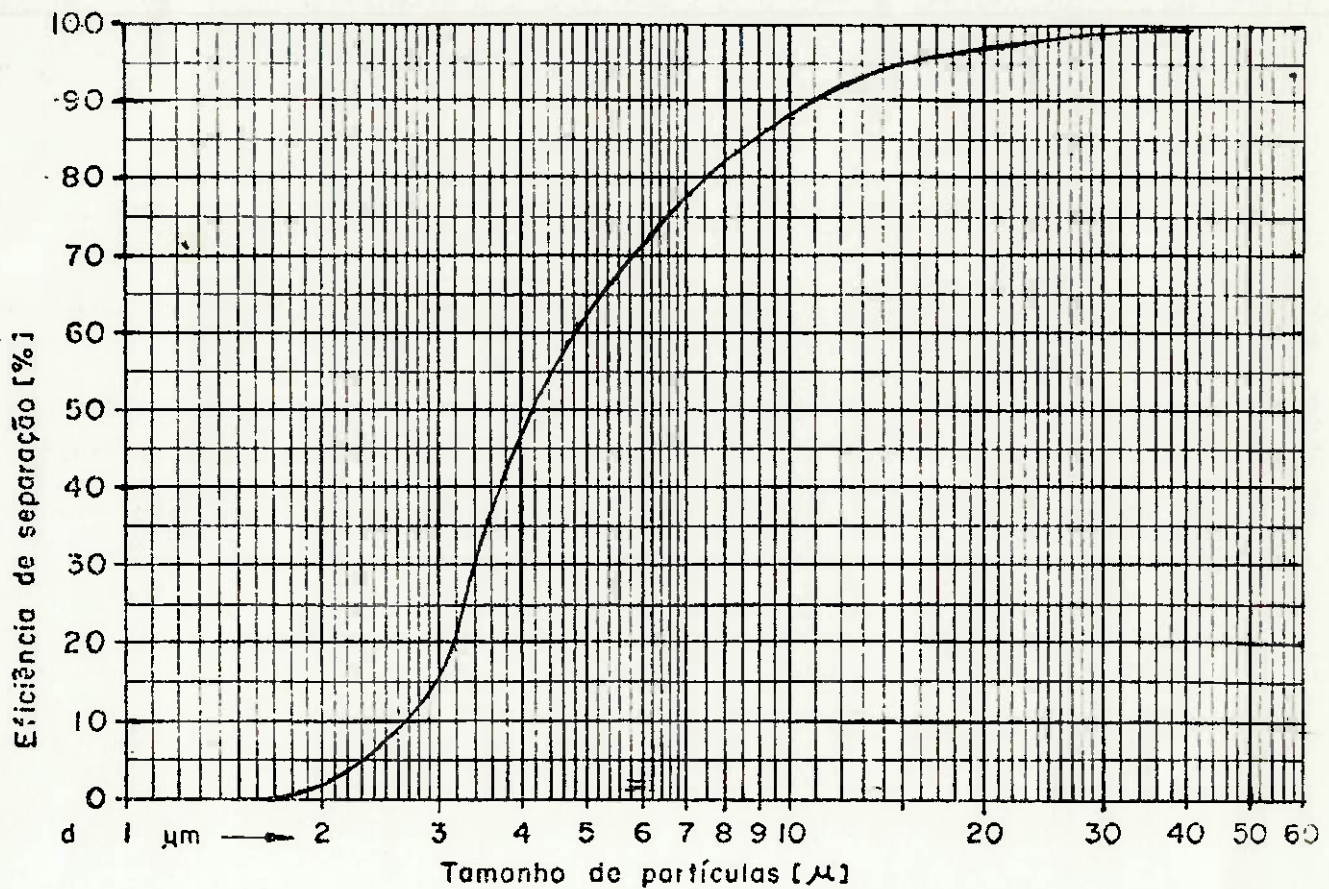


Fig.12 - Curva de eficiência versus Tamanho das partículas.

Utilizando a curva de eficiência acima, que foi plotada para um multiciclone com ciclones de 250 mm de diâmetro, dispostos simetricamente com entradas e saídas de fluido axiais, temos:

$$ef = \frac{9,6 \times 7,5}{100} + \frac{16,2 \times 88,0}{100} + \frac{24,7 \times 96,5}{100} + \frac{35,3 \times 98,5}{100} + \frac{14,2 \times 99,0}{100}$$

onde 7,5; 88,0; 96,5; 98,5 e 99,0 são as eficiências parciais de coleta para o tamanho das partículas de 2,5; 10,0; 20,0; 30,0 e 35,0 microns respectivamente. Assim sendo:

$$ef = 87,6\%$$

Esta é a eficiência para as condições acima apresentadas. Para encontrar a eficiência de um multiciclone com ciclones de 180 mm tipo guide vane inlet (pás orientadas para admissão,  $\theta = 25^\circ$ ),  $p = 40 \text{ mmH}_2\text{O}$ ,  $t = 280 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $d_a = 0,609 \text{ kg/m}^3$  e  $d_p = 2,45 \text{ g/cm}^3$  (densidade da partícula), faremos uso do nomograma abaixo.

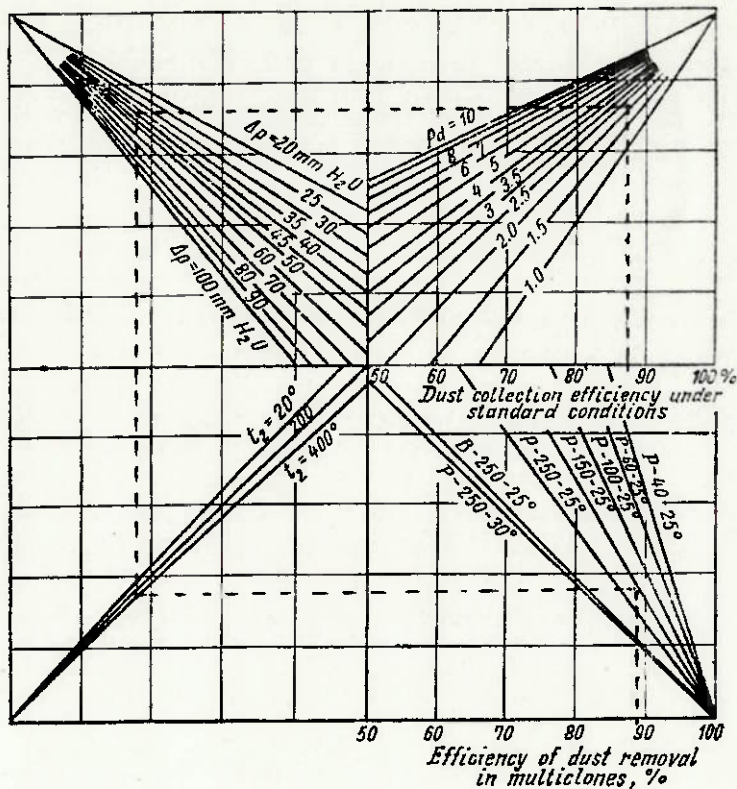


Fig.13 - Nomograma para o cálculo da eficiência em multiclones.

Concluimos então que a eficiência do multiclone projetado é de:

$$ef_{tot} = 89\%$$

Partiremos agora para a escolha de uma válvula rotativa adequada ao projeto.

Voltando à seção 5.2., temos que a quantidade de material particulado por  $m^3$  de óleo combustível utilizado é:

$$m_{part} = 1,25(S) + 0,38$$

$$m_{part} = 1,25 \times 5 + 0,38$$

$$m_{part} = 6,63 \text{ kg}$$

onde (S) é a porcentagem de enxofre em peso no combustível.

$$m_{part}(\text{acumulado}) = ef_{tot} \cdot m_{part}$$

$$m_{part}(\text{acumulado}) = 0,89 \times 6,63$$

$$m_{part}(\text{acumulado}) = 5,9 \text{ kg}$$

Temos que o consumo de óleo combustível em 3 horas foi de 2950 kg. Logo, para 1 hora de funcionamento do multiciclone, podemos montar a seguinte relação:

$$\begin{array}{rcl} 5,9 \text{ kg particulado} & \dots\dots & 1 \text{ m}^3 \text{ de óleo combustível} \\ y & \dots\dots & \frac{2950}{3 \times 0,981} \text{ m}^3 \text{ de óleo comb.} \end{array}$$

$$y = 5914 \text{ kg particulado/h}$$

Sabendo que a densidade da partícula é de  $2,45 \text{ g/cm}^3$ , temos que a quantidade de particulados acumulados em 1 hora é de:

$$Q_{\text{part}} = \frac{5914}{2,45 \times 10^{-3}}$$

$$Q_{\text{part}} = 2,4 \text{ m}^3$$

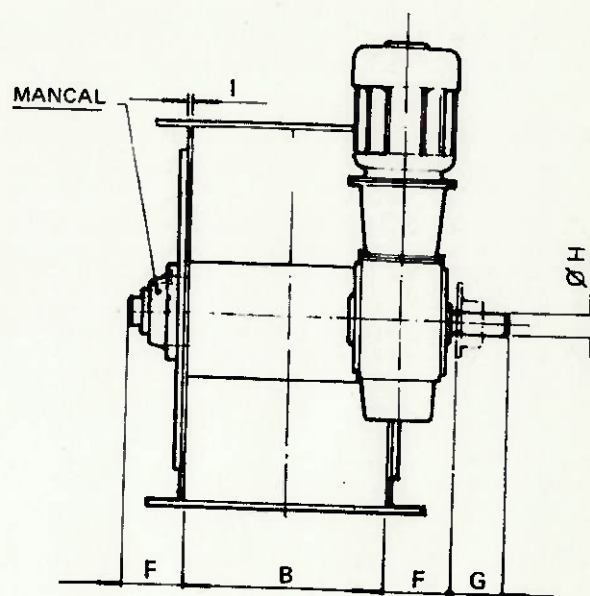
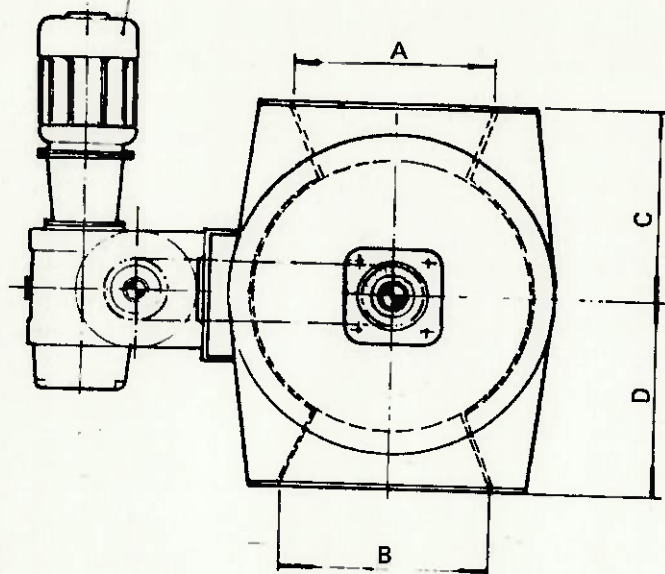
Portanto, a vazão da válvula rotativa deve ser maior do que  $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Através do catálogo da Aerovento Tecnologia do Ar LTDA, escolhemos o modelo VC15 (30 rpm).

Características da válvula rotativa modelo VC15:

- rotação: 30 rpm
- capacidade: 2,6 m<sup>3</sup>/h
- potência do motor: 0,33 CV
- peso aproximado: 125 kg

MOTOR BLINDADO - 4 PÓLOS com flange



MODELO	CAPACIDADE EM m <sup>3</sup> /h CONFORME O R.P.M.			POTÊNCIA DO MOTOR		ROTOR Ø	A	B	C	D	F	G	H	I
	20	30	40	(Normal)	S. Pesada									
VC-15	1,7	2,6	3,4	0,33	0,75	150	114	114	120	120	65	60	1 3/16"	5/32"
VC-20	4	6	8	0,33	0,75	200	150	150	135	135	65	60	1 3/16"	5/32"
VC-30	13,8	20,2	27	0,5	1	300	225	225	200	200	70	70	1 3/8"	3/16"
VC-40	31	46,8	62,4	1	1,5	400	305	305	280	280	75	75	1 1/2"	3/16"
VC-50	62	93,6	124	1,5	2,5	500	380	380	330	330	85	95	1 7/8"	1/4"
VC-60	108	162	216	2	3	600	457	457	380	380	95	110	2 3/16"	1/4"

### 13. BIBLIOGRAFIA.

- \* G. Gordon, Dust Collection and Gas Cleaning - Mir Publishers - Moscou.
- \* Hildo Pera, Geradores de Vapor, Um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia - Editora Fama - São Paulo.
- \* Compilation of Air Pollutant Emission Factors, 3<sup>o</sup> edition, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C. 27.711, August 1977.
- \* CETESB, Nota sobre tecnologia de controle e produção de vapor em caldeiras à combustível líquido, Maio/1984.
- \* Catálogos da Ventiladores Bernauer S.A.
- \* Catálogos da Aerovento Tecnologia do Ar LTDA.
- \* Catálogos da Aero Mecânica Darma S.A.

14. ANEXOS.

14.1. Desenho de um multiclone

14.2. Desenho do detalhe de fixação e funcionamento dos ciclones.